

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)

Кафедра физики Земли.

Направление «Физика»



## Взаимодействие плазмы солнечного ветра с Луной

Бакалаврская работа студента

Беляева Романа Игоревича

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., с.н.с. Дивин А. В.

Рецензент:

к. ф.-м. н., Мингалёв О.В.

Санкт-Петербург

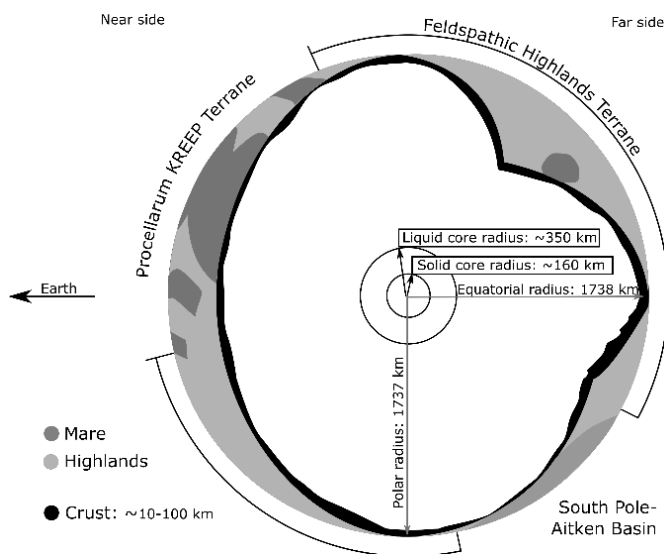
2018

## **Содержание**

<i>1. Введение. ....</i>	<i>3</i>
<i>2. Восстановление магнитного поля Луны. ....</i>	<i>6</i>
<i>2.1. Восстановление поля на высоте 30км [Purucker 2010] <sup>[11]</sup>. ....</i>	<i>6</i>
<i>2.1.1. Метод параметризации поля последовательными диполями. ....</i>	<i>7</i>
<i>2.1.2 Метод разложения поля по зональным гармоникам. ....</i>	<i>7</i>
<i>2.2. Восстановление поля в работе [Tsunakawa 2015] <sup>[12]</sup>. ....</i>	<i>8</i>
<i>3. Взаимодействие магнитных аномалий с солнечным ветром. ....</i>	<i>9</i>
<i>3.1. Отражение ионов от магнитных аномалий. ....</i>	<i>10</i>
<i>4. Зависимость коэффициента отражения от величины магнитного поля. ....</i>	<i>12</i>
<i>4.1. Искользованные данные гармонического разложения магнитного поля и коэффициента отражения протонов солнечного ветра. ....</i>	<i>12</i>
<i>4.2. Изучение корреляции коэффициента отражения и величины магнитного поля. ....</i>	<i>14</i>
<i>4.2.1. Корреляция всей рассматриваемой области. ....</i>	<i>15</i>
<i>4.2.2. Корреляция для изолированной аномалии ....</i>	<i>16</i>
<i>4.3. Выделяемые области в распределении коэффициента отражения от величины магнитного поля. ....</i>	<i>17</i>
<i>4.3.1. Изолированная область нормального отражения. ....</i>	<i>18</i>
<i>4.3.2 Изолированная область аномального отражения. ....</i>	<i>20</i>
<i>4.3.3. Расширенная область аномального отражения. ....</i>	<i>21</i>
<i>4.4. Изучение общего вида зависимости коэффициента отражения от величины магнитного поля. ....</i>	<i>22</i>
<i>4.4.1 Функциональный вид распределения коэффициента отражения от величины магнитного поля. ....</i>	<i>23</i>
<i>5. Заключение. ....</i>	<i>24</i>
<i>Список литературы. ....</i>	<i>25</i>

## 1. Введение.

Взаимодействие солнечного ветра с Луной существенно отличается от поведения плазмы в окрестностях Земли. Изучение характера этого взаимодействия является одной из важнейших задач современной физики космической плазмы, имеющей теоретическое и (в перспективе) практическое значение. Луна является единственным естественным спутником Земли, а также ближайшим и наиболее хорошо исследованным космическим объектом, она с давних времен являлась объектом для наблюдений.



Всесторонний обзор строения Луны дается в [Wieczorek et al., 2006]<sup>[1]</sup>. На рис. 1 показаны расчетные радиусы твердых и жидких ядер, основанные в основном на поверхностных приборах Apollo [например, Hood, 1986]<sup>[2]</sup> и моделях ранней эволюции мантии [Smith et al., 1970; Wood et al., 1970]<sup>[3,4]</sup>, вместе с результатами более поздних спутниковых картографических миссий [например, Lawrence et al., 1998]<sup>[5]</sup>.

Рисунок 1. Строение Луны [Wieczorek et al., 2006]<sup>[1]</sup>

Большой научной задачей в годы раннего изучения Луны являлся вопрос о наличии или отсутствии собственного магнитного поля. Так, первые наблюдения, сделанные спутником Луна-2 (1959г.), дали оценку верхней границы дипольного магнитного момента Луны в  $\sim 10^{-4}$  магнитного момента Земли. Пролет спутника Explorer-35 (1967г.) на расстоянии в  $\sim 800$  км дал оценку интенсивности дипольной компоненты магнитного поля (при ее наличии) всего в несколько нТ на поверхности Луны, а также было подтверждено отсутствие ударной волны.

Тела, которые не обладают существенной атмосферой и сильными магнитными полями (такие как Луна и астероиды), считаются пассивными поглотителями набегающего потока плазмы [Cravens, 2004]<sup>[6]</sup>. Ионы и электроны солнечного ветра непосредственно воздействуют на поверхность этих тел, а замороженное магнитное поле плазмы проходит через препятствие относительно спокойно, если проводимость мала. За объектом создается область с пониженной концентрацией плазмы (рис. 2), называемая плазменной тенью (или кильватером). Этот след постепенно заполняется плазмой солнечного ветра вниз по течению,

посредством теплового расширения. [Farrell et al., 1998] <sup>[7]</sup>.

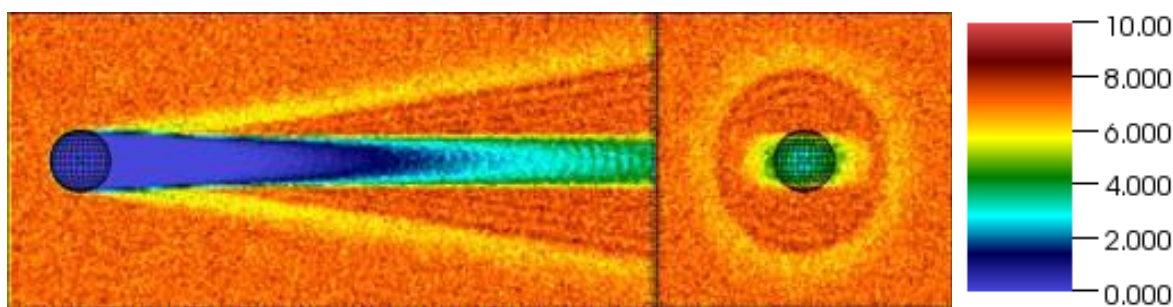
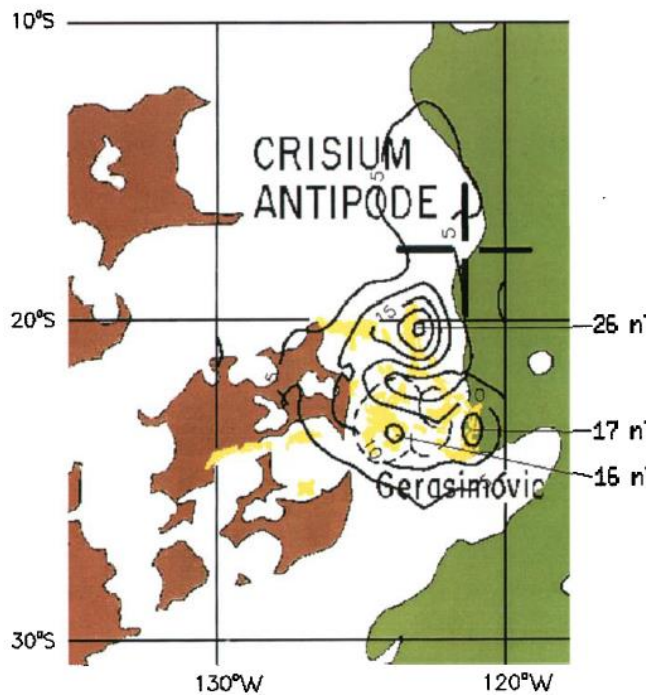


Рисунок 2 Взаимодействие солнечного ветра с немагнитной непроводящей и поглощающей Луной. Визуализация плотности солнечной плазмы [Holmstrom, 2012] <sup>[8]</sup>.

Измерение магнитного поля Луны во время миссий Apollo подтвердило отсутствие глобального дипольного магнитного поля, а также позволило сделать первые предположения о том, что Луна имеет области с сильными магнитными полями с размерами до 100 км и напряжённостью поля более 300 нТ на поверхности и порядка 2 нТ на высоте 100 км [Dyal, 1974] <sup>[9]</sup>. Род же этих аномалий не связан с глобальным магнитным полем, а является результатом остаточной намагниченности лунной коры. Исследования образцов лунного грунта дали основание предполагать, что 3,6-3,8 млрд. лет назад они подвергались воздействию магнитного поля сравнимого по интенсивности с земным.

Существует две основные модели возникновения остаточной намагниченности на участках поверхности Луны. Первая модель предполагает существование раннего глобального магнитного поля, которое осталось «вморожено» в лунные породы по мере их охлаждения ниже точки Кюри в процессе остывания. Вторая модель связывает образование областей локальной намагниченности с импульсными магнитными полями, генерируемыми во время падения крупных метеоритов в присутствии окружающего магнитного поля. Данная гипотеза подтверждается тем, что крупнейшие области намагниченности лунной коры расположены противоположно (по сфере) областям гигантских ударных бассейнов.

Несмотря на существенные успехи в первые десятилетия исследований, построение точной глобальной карты намагниченности поверхности стало возможным только в 90-е годы XX века в результате регулярных измерений спутниками Lunar Prospector и Lunar Orbiter. Построение подобных карт является необходимым элементом для изучения ранней геологической истории Луны, а также для детального описания взаимодействия с солнечным ветром.



Lunar Prospector, завершивший в конце XX века систематическое измерение величины магнитного поля в окрестности Луны, обнаружил поверхностные магнитные поля с интенсивностью до 300 нТ и с масштабами от 7 до 1000 км. Их расположение было приблизительно противоположно (по сфере) некоторым крупным лунным морям [Hood et al., 2001]<sup>[10]</sup>: Морю Дождей, Морю Ясности, Морю Кризисов (рис. 3) и Морю Восточному).

Рисунок 3. Карта интенсивности магнитного поля лунной коры в области магнитной аномалии антиподальной Морю Кризисов [Hood et al, 2001]<sup>[10]</sup>.

Целью данной работы является изучение особенностей взаимодействия плазмы солнечного ветра с поверхностными магнитными аномалиями Луны. Для этого мы будем использовать два набора данных, полученных разными современными методами отображения магнитных аномалий. Первый из них является восстановлением магнитного поля по сферическим гармоникам, полученным в работе [Tsunakawa, 2015]<sup>[12]</sup>. Второй набор данных берется из работы [Lue, 2011]<sup>[11]</sup> и является отображением магнитных аномалий посредством измерения потока отраженных протонов с поверхности. В ходе работы мы попробуем найти статистическую связь этих данных и выявить вид этой зависимости.

## **2. Восстановление магнитного поля Луны.**

Понимание параметров магнитного поля на лунной поверхности необходимо для определения характера взаимодействия солнечного ветра с Луной и распределения заряженных частиц в окрестности. Благодаря большой накопленной статистике наблюдаемого поля, собранной за многие годы низковысотными спутниками Lunar Prospector (1998-1999) и Kaguya (2007-2009), в настоящее время получены достаточно точные карты магнитного поля.

Существует несколько основных алгоритмов построения трехмерного распределения магнитного поля в окрестности Луны, использующих разложение скалярного потенциала по сферическим гармоникам. Ниже мы приведем краткий обзор двух подобных методов, которые были использованы в работах Purucker [2010]<sup>[11]</sup> и Tsunakawa [2015]<sup>[12]</sup>.

### **2.1. Восстановление поля на высоте 30км [Purucker 2010]<sup>[11]</sup>.**

В работе Purucker [2010]<sup>[11]</sup> было произведено восстановление поля на высоте 30 км (рис. 4) с использованием ~2,7 млн наблюдений поля. Были использованы измерения магнитометром с низким уровнем шума спутника Lunar Prospector на высотах орбиты 11-60км, усредненные по периоду 5с (или ~9км по орбите). Для анализа данных отбирались интервалы спокойного солнечного ветра, а также наблюдения во время пролетов на ночной стороне Луны.

Разложение осуществлялось до 170 гармоники, что соответствовало минимальному разрешению пространственных масштабов в ~66км. Восстановление производилось двумя схожими методами: параметризацией последовательными диполями и разложением по зональным гармоникам, дающие практически идентичные результаты для  $n > 14$ . Также необходимо заметить, что гармоники с 1 по 15 практически не оказывали влияние на суммарное поле, что говорило об отсутствии магнитных структур на масштабах  $> 660$ км. Дадим ниже их краткое описание.

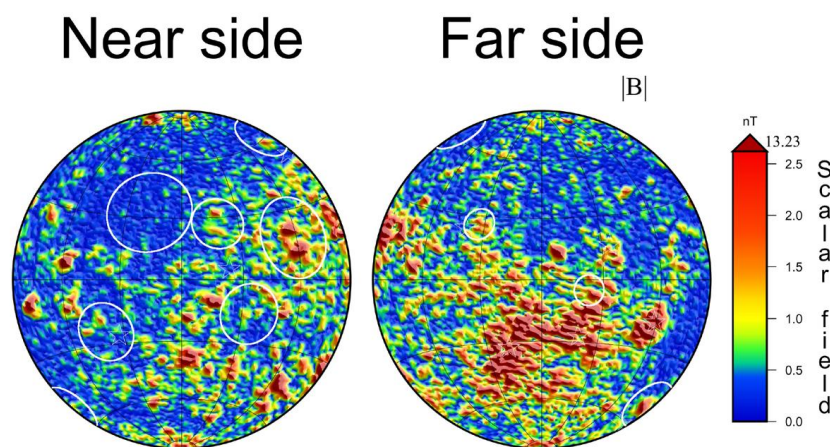


Рисунок 4. Карта абсолютной величины магнитного поля на высоте 30км, полученная Purucker [2010]<sup>[11]</sup> с использованием гармоник до 170.

### 2.1.1. Метод параметризации поля последовательными диполями.

Первый метод аппроксимирует магнитное поле точечными диполями, расположенными в узлах сетки на поверхности. Магнитное поле точечного диполя может быть записано как градиент скалярного потенциала:

$$V(r, \theta, \varphi) = -\vec{M} \cdot \nabla \left( \frac{1}{l} \right); \quad (1)$$

где  $M$  – дипольный момент, а  $l$  – расстояние между диполем и точкой наблюдения. Параметры дипольных моментов подбираются с помощью метода наименьших квадратов по измеренным значениям  $B_r$  и  $B_\theta$ . Далее результирующее поле представляется в виде ряда по сферическим гармоникам:

$$V(r, \theta, \varphi) = a \sum_{n=1}^N \left( \frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] P_n^m(\theta); \quad (2)$$

где  $\theta$  и  $\varphi$ , соответственно зенитный и азимутальный углы,  $a=1737.1$  км (усредненный радиус Луны),  $P_n^m$  – присоединенные полиномы Лежандра в нормировке Шмидта, и  $g_n^m$  и  $h_n^m$  – коэффициенты сферического разложения.

### 2.1.2 Метод разложения поля по зональным гармоникам.

Во втором алгоритме также использовались значения  $B_r$  и  $B_\theta$ . При каждом пролете по полярной полуорбите с долготой  $\varphi$  наблюдаемое поле раскладывалось по зональным гармоникам:

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^N [(n+1)g_n^0 \left( \frac{a}{r} \right)^{n+2}] P_n^0(\theta); \quad (3)$$



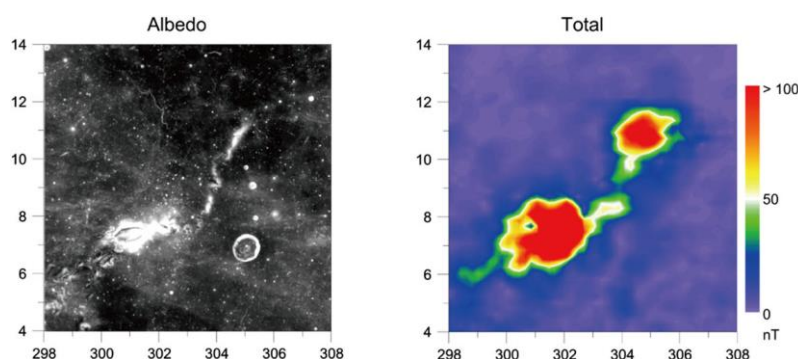
$$B_{\theta} = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\sum_{n=1}^N [g_n^0 \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2}] \frac{dP_n^0(\theta)}{d\theta}; \quad (4)$$

Далее коэффициенты  $g_n^0(\varphi)$  группировались в ячейки размера  $\Delta\varphi=1$  и по ним восстанавливались коэффициенты  $g_n^m, h_n^m$ , используемые в формуле (2).

## **2.2. Восстановление поля в работе [Tsunakawa 2015]<sup>[12]</sup>.**

В работе Tsunakawa [2015]<sup>[12]</sup> глобальные карты по трем компонентам были получены методом поверхностного векторного отображения (Surface Vector Mapping, SVM). Данные состояли из около 5 миллионов наблюдений за магнитным полем Луны на высотах 10-45 км лунными спутниками Kaguya и Lunar prospector. Kaguya наблюдал магнитное поле вокруг Луны на полярной орбите на малых высотах 9-80 км с декабря 2008 года по июнь 2009 года. Высота была постепенно снижена с перицентром около бассейна Южного полюса (SPA), так как сильные и обширные магнитные аномалии распределены вокруг этой области [например, Richmond and Hood, 2008; Mitchell et al., 2008]<sup>[13,14]</sup>. Три составляющие магнитного поля наблюдались магнитометром Kaguya / MAP / LMAG с точностью выше 0,05 нТл и с временным разрешением в 32 Гц.

Лунные магнитные аномалии отображались на расстоянии  $0,2^\circ$  (~6км) друг от друга методом SVM, демонстрируя самую высокую интенсивность 718 нТ в области, противоположной Морю Кризисов, в то время как области бассейнов Моря Дождей и Моря Восточного показывали очень слабые или почти отсутствующие поля, что также подтверждалось в предыдущих исследованиях. Величина поля была выше, чем в работе Purucker [2010]<sup>[11]</sup> благодаря увеличенному числу гармоник. Также увеличенное разрешение позволило наблюдать поля даже небольших структур на поверхности, сопоставимых с масштабами вихрей выветривания (рис 5).



**Рисунок 5. Сопоставление альbedo в области аномалии Райнер Гамма (левое изображение) с интенсивностью магнитного поля на поверхности (правое изображение). [Tsunakawa, 2015]<sup>[12]</sup>.**



### 3. Взаимодействие магнитных аномалий с солнечным ветром.

Когда поверхность Луны подвергается воздействию набегающего потока плазмы, приповерхностное магнитное поле деформируется под действием динамического давления солнечного ветра [Dyal et al., 1972]<sup>[15]</sup>, а также происходит отклонение плазмы от наиболее интенсивных аномалий [прим. Saito et al., 2012]<sup>[16]</sup>. Измерения показывают, что сильные магнитные аномалии могут взаимодействовать с солнечным ветром [Russell and Lichtenstein, 1975]<sup>[17]</sup>. Образование ударной волны [Lin et al., 1998]<sup>[18]</sup> и плазменных пустот над магнитными аномалиями было обнаружено при наблюдениях за магнитным полем и отражением электронов от участков с сильной намагниченностью [Halekas et al., 2008]<sup>[19]</sup>. Похожие структуры были найдены в моделированиях [Harnett and Winglee, 2000]<sup>[20]</sup>, [Fatemi, 2015]<sup>[30]</sup>, [Deca, 2018]<sup>[31]</sup>. Однако, наше понимание взаимодействия и формирования мини-магнитосферы очень ограничено из-за отсутствия данных вблизи поверхности Луны, а также из-за большого разброса параметров плазмы солнечного ветра.

Недавно Futaana et al., [2006]<sup>[21]</sup> предложили метод визуализации мини-магнитосфер, использующий поток нейтральных атомов водорода с поверхности. Идея состояла в том, что отражение протонов солнечного ветра в виде высокоэнергичных нейтральных атомов водорода пропорционально потоку протонов, достигающих поверхности. Поскольку количество таких протонов мало вблизи магнитных аномалий, то ожидается пропорционально меньший поток нейтральных атомов. В работе Wieser et al. [2009]<sup>[22]</sup> с помощью данных о потоке нейтральных атомов со спутника Chandrayaan-1 удалось отобразить магнитосферу на поверхности (рис. 6), что проявилось в виде уменьшения потока на 50% над сильной магнитной аномалией. Однако, не только нейтральные атомы несут подобную информацию.

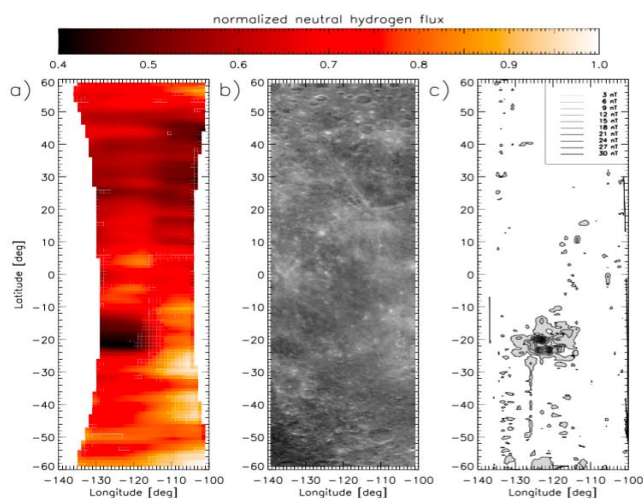


Рисунок 6. Наблюдение магнитной аномалии вблизи кратера Герасимовича. а) Наблюдаемый интегральный поток нейтрального водорода с использованием функции углового рассеяния б) Карта альбедо предоставленная космическим аппаратом Cassini. в) Напряжённость магнитного поля, измеренная магнитометром на Lunar Prospector на высоте 30км. [Wieser et al., 2009]<sup>[22]</sup>.

### 3.1. Отражение ионов от магнитных аномалий.

Отклонение и (или) отражение ионов солнечного ветра является одной из наиболее заметных особенностей, обнаруживаемых в окрестности сильных магнитных аномалий [Saito et al., 2010, 2012; Lue et al., 2011] <sup>[23,24]</sup>, т.е. сильные магнитные поля могут препятствовать доступу протонов солнечного ветра к лунной поверхности (рис. 9). О формировании плазменной полости вокруг сильных полей лунной коры на дневной стороне сообщалось при экспериментальном наблюдении [Halekas et al., 2008] <sup>[19]</sup> и симуляциях [например, Deca et al., 2016, рис. 7] <sup>[25]</sup>.

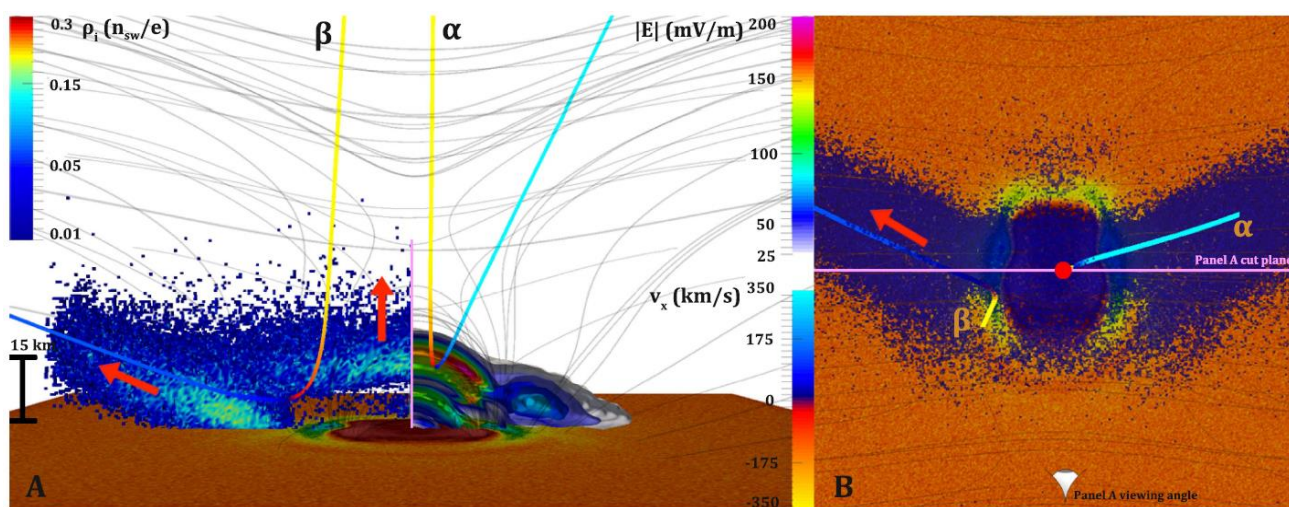
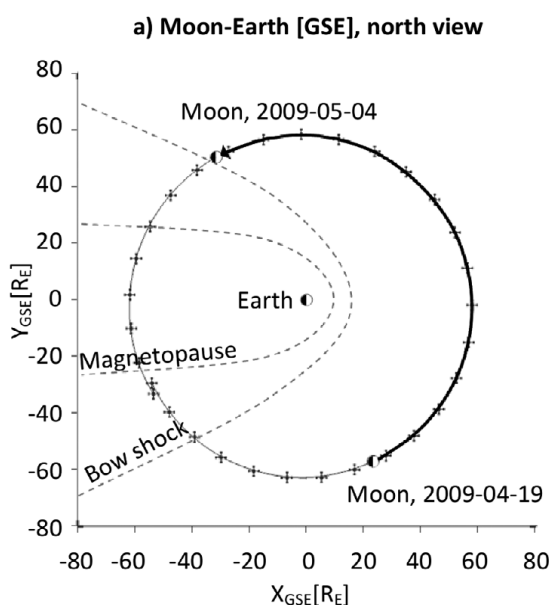


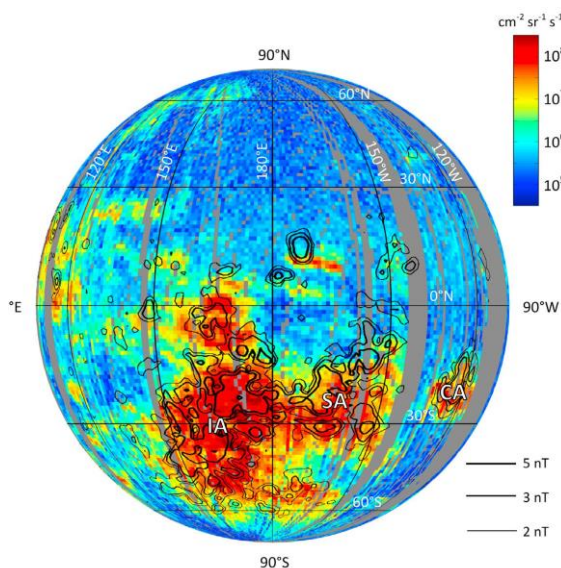
Рисунок 7. Моделирование распределения ионов, рассеянных горизонтальным диполем. Панель А разделена посередине вдоль плоскости XY, слева отображена плотность отраженных ионов, а справа величина электрического поля.  $\alpha$  и  $\beta$  – две популяции ионов, окрашенные компонентой скорости  $V_x$ . Ось X направлена от лунной поверхности. Панель В – вид сверху. [Deca et al., 2016] <sup>[25]</sup>.



В работе [Lue, 2011] <sup>[24]</sup> были исследованы данные детектора отраженных протонов SWIM спутника Chandrayaan-1, собранные в течение 15 дней с 19 апреля по 4 мая 2009 года (рис. 8). В этот промежуток времени Луна находилась вне ударной волны Земли, то есть подвергалась воздействию невозмущенного солнечного ветра. Chandrayaan-1 имел полярную орбиту с общим покрытием  $>180^\circ$  по долготе за двухнедельных период.

Рисунок 8. Положение Луны в системе координат геоцентрической солнечной эклиптики (GSE) за исследуемый период с 19 апреля по 4 мая 2009 г. Также отмечены моделируемая ударная волна [Fairfield, 1971]<sup>[26]</sup> и магнитопауза [Shue et al., 1997]<sup>[27]</sup>, указанные пунктирными линиями. [Lue, 2009]<sup>[24]</sup>.

Детектор SWIM измерял интенсивность потока положительно заряженных частиц в диапазоне энергий от 100 эВ до 3 кэВ с разрешением по энергиям  $dE / E \sim 7\%$ , массовое разрешение составляло  $dm / m \sim 50\%$  и временное разрешение 8 с. Поле зрения инструмента  $9^\circ \times 180^\circ$



Используя 15-дневный период данных, в работе [Lue, 2011]<sup>[24]</sup> была построена карта наблюдаемого отраженного потока протонов (рис. 9). Для каждого 8-секундного периода наблюдения бралось пиковое значение отклоненного дифференциального потока, наблюдаемого прибором, и линейно привязывалось к ячейке поверхности, образуя карту с разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ .

Рисунок 9. Карта наблюдаемых отклоненных протонов в диапазоне энергий 200 эВ-1,7 кэВ. Черные контуры показывают напряженность магнитного поля 2 нТ, 3 нТ и 5 нТ на высоте 30 км в модели Purucker [2008]<sup>[11]</sup>. Хорошо наблюдается крупномасштабный кластер на антипode Imbrium (IA), а также Antipode Serenitatis (SA), Crisium Antipode (CA) и несколько меньших магнитных аномалий. [Lue, 2011]<sup>[24]</sup>

Эффективность отражения была на уровне  $\sim 1\%$  для всей области наблюдения, увеличиваясь до  $\sim 10\%$  для всей области аномалий (10% площади) и до  $\sim 50\%$  для самых сильных аномалий (0,1% площади). Это значение находится в хорошем согласии с другими исследованиями Saito et al. [2010]<sup>[16]</sup>, где коэффициент отражения ионов в окрестности магнитных аномалий оценивается в  $>10\%$ , а также с уменьшением потока нейтрального водорода на сильной магнитной аномалии, о которой сообщал Wieser et al. [2010]<sup>[22]</sup> с использованием методов ENA, достигает 50%.

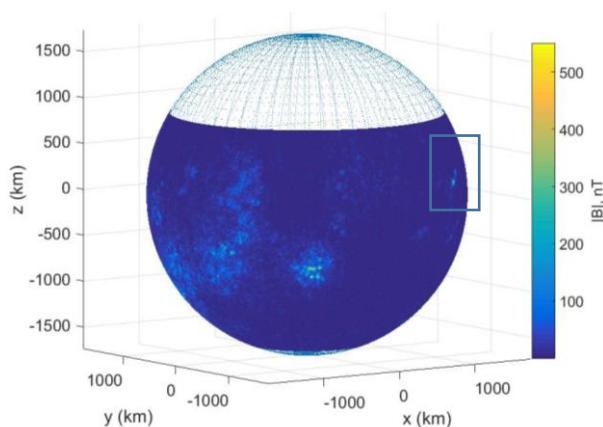
[Halekas et al., 2006]<sup>[28]</sup>, используя более ранние аргументы [Greenstadt, 1971]<sup>[29]</sup>, утверждал, что большие группы аномалий могут формировать минимагнитосферы достаточно большого размера. Построенные карты показывают, что это действительно так (рис. 9). Такие группы аномалий способны отклонять поток солнечного ветра в масштабе более 1000 км, что

превышает типичный гирорадиус протона. Также плотность потока энергии отраженных ионов над такими областями существенно превышает энергию, переносимую солнечным ветром, что приводит к генерации волн, неустойчивостей и формированию областей типа форшока, но без собственно ударной волны.

#### **4. Зависимость коэффициента отражения от величины магнитного поля.**

В данной работе была исследована статистическая связь между данными двух разных методов отображения магнитных аномалий на Луне: восстановлением магнитного поля по сферическим гармоникам и наблюдением коэффициента отражения протонов солнечной плазмы от поверхности. Была исследована зависимость коэффициента отражения от величины магнитного поля, сосчитана её линейная корреляция для разных областей и высот, а также была совершена попытка аппроксимировать данную зависимость кривой.

##### **4.1.Использованные данные гармонического разложения магнитного поля и коэффициента отражения протонов солнечного ветра.**



**Рисунок 10.** Сосчитанное поле для 0км с использованием разложения до 448 гармоники.

Для расчета магнитного поля были использованы значения коэффициентов  $g_n^m, h_n^m$ , полученные в работе [Tsunakawa, 2015]<sup>[12]</sup>. По ним было сосчитано поле по формуле (2) для высот 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 50км в разложении до 448 гармоники и разрешением 450 на 900 точек(~6-7км) (рис 10.).

Отображение такой высокой точности давало значения поля с разрешением 0,2 градуса и интенсивностью поля до 550 нТ на высоте 0км. С таким отображением можно рассматривать даже довольно малые магнитные аномалии, сопоставимые с размерами лунных вихрей выветривания. На рисунке можно увидеть лунную аномалию Райнер Гамма в правом углу карты на (рис 10).



Данные коэффициента отражения были взяты из работы Lue [2011]<sup>[24]</sup> (рис. 11) и являлись массивом данных размера 180 на 180 точек, соответствующие отображению дальнего полушария Луны с разрешением в 1 градус. Значения коэффициента принимали значения от  $\sim 0.0001$  до практически 1 над сильными аномалиями, что могло оказаться некоторой ошибкой измерения. Также имелся ряд областей, в которых отсутствовали измерения коэффициента отражения. Для уменьшения влияния этих областей на результат работы, мы заполним эти точки средними значениями по окну  $5^\circ$  на  $5^\circ$ , а также постараемся избегать областей с наибольшими пропусками.

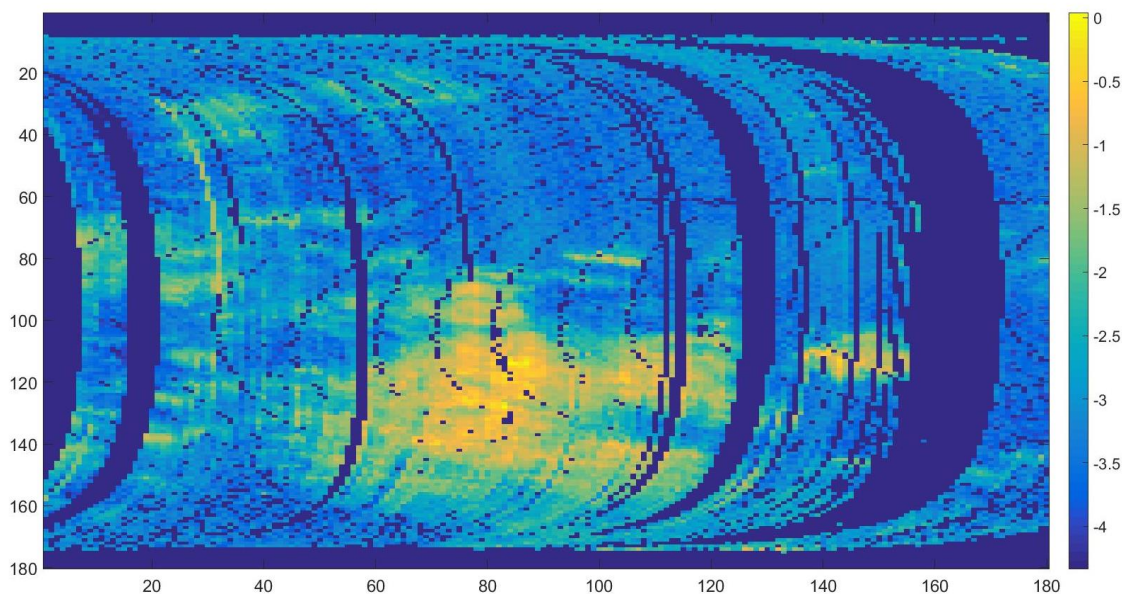


Рисунок 11. Визуализация десятичного логарифма коэффициента отражения. В синих областях отражение не наблюдалось.

Карты магнитного поля и отражения были приведены к единой системе координат, а также была выбрана область с наилучшим покрытием наблюдаемого коэффициента отражения (рис. 12).

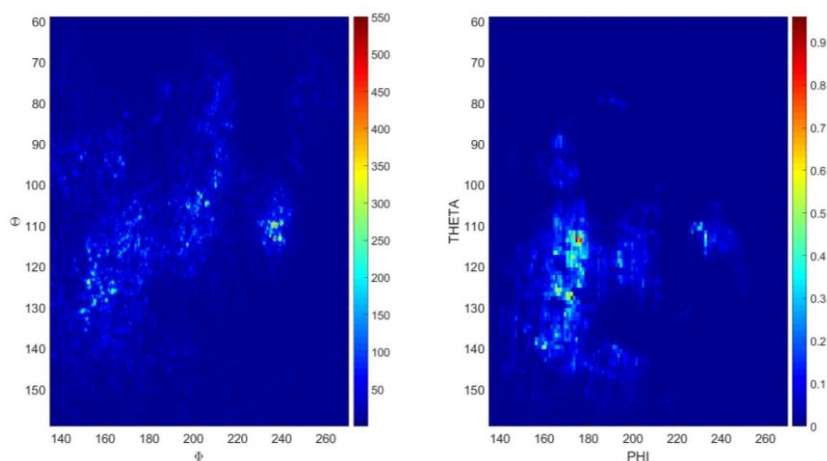


Рисунок 12. Карты абсолютного значения магнитного поля (шкала в нТ) на высоте 0км и величины отражения, исследуемые в данной работе.

Сразу же можно отметить высокую схожесть между двумя этими изображениями. Несмотря на некоторые расхождения в положениях максимумов интенсивностей обеих карт, коэффициент отражения хорошо обозначает наличие магнитных аномалий, а также соответствует их форме. Но может ли его величина характеризовать величину магнитного поля данной аномалии?

#### **4.2. Изучение корреляции коэффициента отражения и величины магнитного поля.**

Коэффициент корреляции является наиболее простой мерой, указывающей на наличие линейной связи двух наборов статистических данных. В этом исследовании мы будем использовать коэффициент линейной корреляции Пирсона, который рассчитывался по формуле:

$$R_{XY} = \frac{cov_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{ij} (X_{i,j} - \bar{X})(Y_{i,j} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{ij} (X_{i,j} - \bar{X})^2 \sum_{ij} (Y_{i,j} - \bar{Y})^2}}$$

где  $X$  – значение величины поля в точке, а  $Y$  – значение коэффициента отражения. А  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  – их средние значения в окне, соответственно.

Коэффициент корреляции принимает значения от -1 до 1. Его абсолютное значение говорит нам о характере связи между величинами: значение близкое к 1 говорит нам о наличии линейной связи между величинами, а значение близкое к 0, говорит о том, что статистическая связь между величинами более сложная (если она имеется). Знак коэффициента указывает на направление зависимости: положительное значение – связь прямая, а отрицательное - обратная.

Для более точного наблюдения и построения зависимостей каждое рассматриваемое окно для поля и отражения приводится с помощью интерполяции к некоторому стандартному виду: массиву данных 50 на 50 точек. Предполагается, что зависимость коэффициента отражения от поля не имеет вид простой линейной связи, поэтому рассматривается корреляция между логарифмами этих величин для каждого выбранного окна. Это позволит нам учесть степенную взаимосвязь между ними.

Если распределение в двойном логарифмическом масштабе принимает вид прямой, то тангенс наклона этой прямой несет информацию о степенной зависимости:

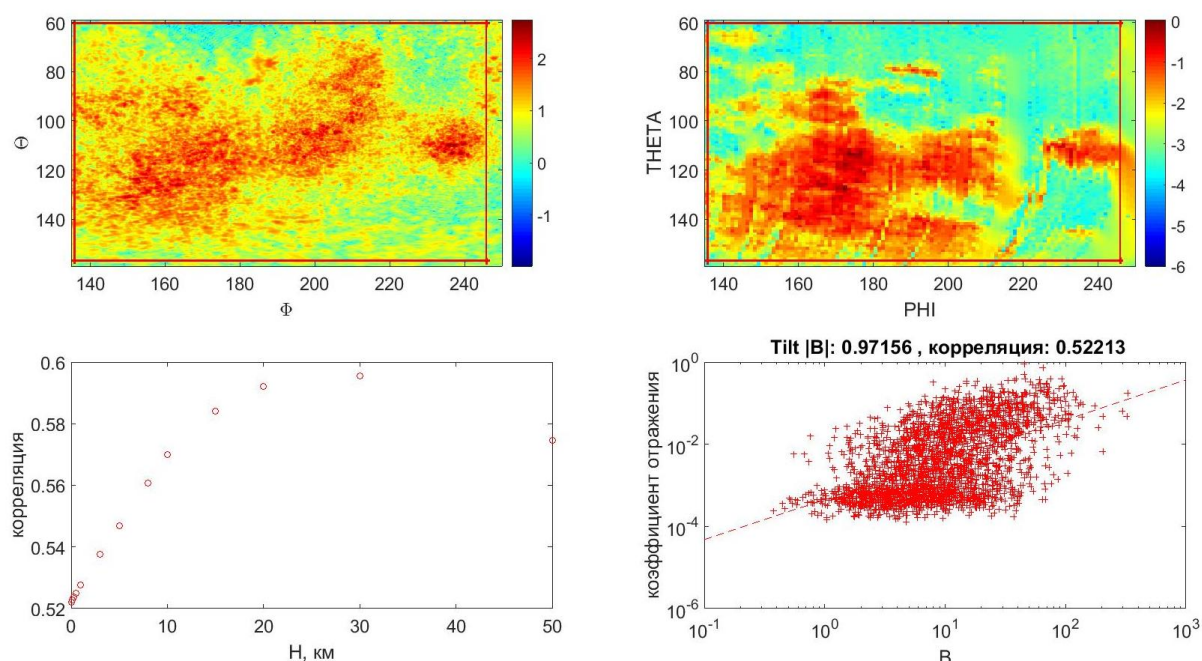
$$\log_{10} R = A \log_{10} |B| + \text{const}; \rightarrow R \sim |B|^A$$

где  $R$  – коэффициент отражения,  $|B|$  - модуль магнитного поля,  $A$  – тангенс наклона прямой.

Также распределение величин магнитного поля и коэффициента отражения было визуализировано в отдельном окне в двойном логарифмическом масштабе, чтобы иметь представление о виде данной зависимости, так как коэффициент корреляции и угол наклона не являются исчерпывающими параметрами.

#### **4.2.1. Корреляция всей рассматриваемой области.**

Для изучения общей корреляции данных была выбрана область наибольшей целостности значений коэффициента отражения (рис. 13). На высоте 0 км коэффициент линейной корреляции отражения и  $|B|$  составлял 0,52, а тангенс угла наклона между логарифмами оказался 0.97156. Положительные значения корреляции и угла наклона говорят нам об общем возрастании коэффициента отражения при увеличении интенсивности магнитного поля, что и предполагалось изначально. Также не очень большой коэффициент корреляции может говорить о большом уровне шума, который заметен на визуализации распределения, или о наличии нелинейной зависимости, которая также имеет место быть.



**Рисунок 13. Коэффициент корреляция всей наблюдаемой области. На левом верхнем(1) блоке отображен десятичный логарифм абсолютной компоненты наблюдаемого поля. На правом верхнем(2) - логарифм коэффициента отражения с усреднением в пустых областях. Левый нижний блок(3) представляет отображение зависимости коэффициента корреляции от высоты рассматриваемого поля. На правом нижнем(4) визуализировано распределение коэффициента отражения от величины магнитного поля, Tilt  $|B|$  - тангенс наклона линейной аппроксимации.**



Также была рассмотрена зависимость коэффициента корреляции от высоты восстанавливаемого поля (Рис. 13.3). Наибольшая корреляция наблюдается для высот 20 (рис. 14.1) и 30 км, что может говорить нам о вероятном вертикальном размере минимагнитосфер. Дальнейшее убывание корреляции с высотой связано с уменьшением общей интенсивности магнитного поля (рис. 14.2), что приводит к слабой различимости магнитных аномалий.

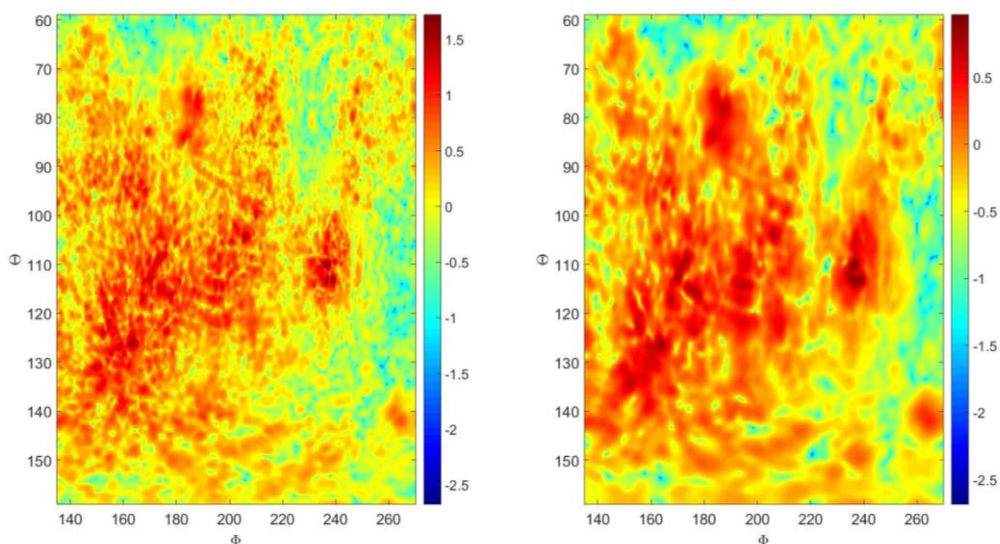


Рисунок 14. Модуль величины магнитного поля на высотах 20 и 50км.

#### **4.2.2. Корреляция для изолированной аномалии**

Теперь посмотрим, сохраняется ли подобная структура распределения (рис. 13.4) для изолированных аномалий, является ли такая форма распределения характерной или это случайный процесс. Для этого была взята одна из хорошо коррелирующих, на первый взгляд, областей среднего масштаба (рис. 15) и были проведены те же действия, что и для большей области. Было взято окно размера  $20^\circ \times 39^\circ$ , примерно в 20 раз меньше наблюдаемого нами ранее.

Коэффициент линейной корреляции меньшей области оказался существенно выше той, которая была для всей карты, предположительно благодаря меньшему «шуму», но наблюдается другая зависимость от высоты. Небольшое начальное уменьшение коэффициента с высотой может быть вызвано усреднением отсутствующих в коэффициенте отражения областей, далее она возрастает до максимума на высоте 15км; меньшая высота максимума может быть обусловлена меньшим масштабом аномалии, чем наблюдаемые на других областях карты.

Распределение коэффициента отражения имеет также подобный вид, кроме того можно отметить меньшую зашумленность в данной области, а также немного больший угол наклона и большую концентрацию для меньших коэффициентов отражения. Это подводит нас к мысли о виде такого распределения.

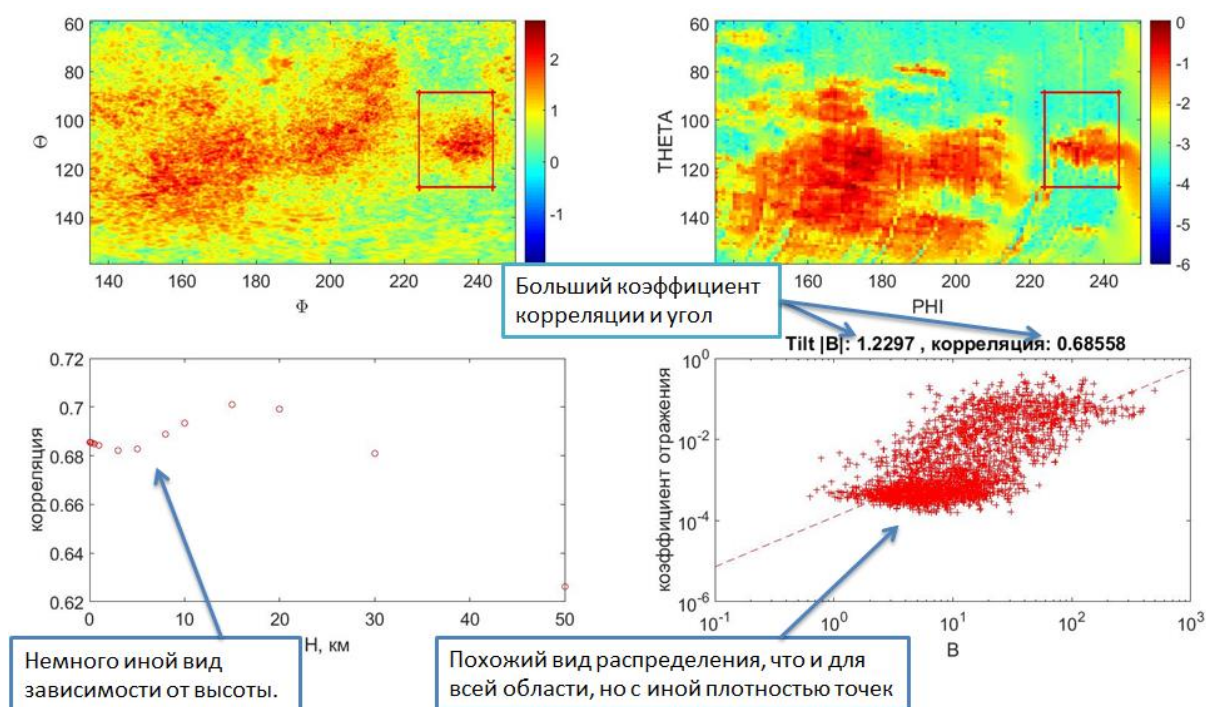


Рисунок 15. Корреляция малой области. Обозначение те же, что и для рисунка 13.

#### **4.3. Выделяемые области в распределении коэффициента отражения от величины магнитного поля.**

Попробуем выделить некоторые особенности в распределении коэффициента отображения от величины магнитного поля в двойной логарифмической шкале. Это может позволить узнать нам, из чего складывается итоговое отображение и выявить его характерные особенности.

Несмотря на сильный разброс в данных, здесь явно проглядываются 2 характерные группы с наибольшей плотностью точек (рис. 16): наклонная верхняя область сильного отражения, которую мы назовем аномальной компонентой, и практически горизонтальная нижняя со слабым отражением, которую будем называть нормальной компонентой.

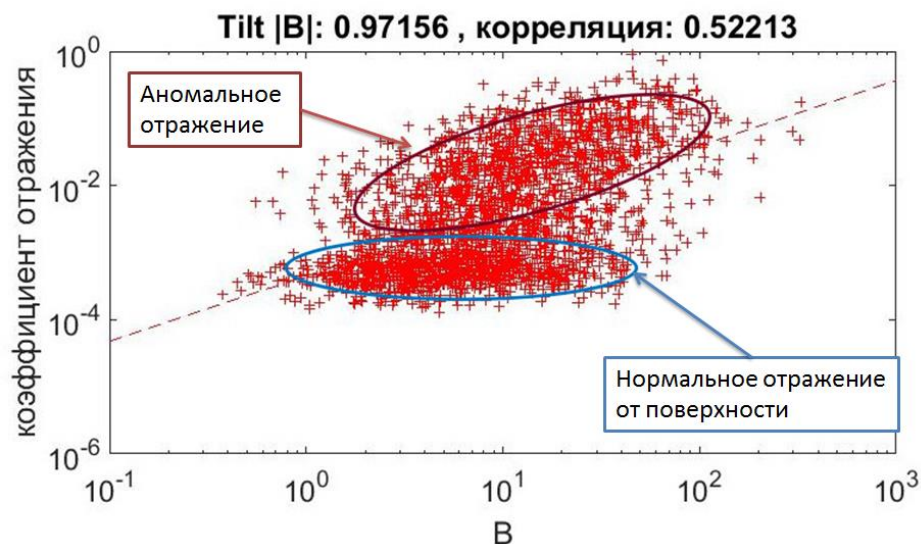


Рисунок 16. Распределение коэффициента отражения от интенсивности магнитного поля.

Нормальная составляющая получила такое название, потому что она наблюдается по всей дневной области Луны вне сильных аномалий и обусловлена взаимодействием солнечного ветра непосредственно с лунной поверхностью. Рассеяние протонов на кристаллической решетке обладает низкой эффективностью (менее 1%) и определяется только интенсивностью потока солнечного ветра. Аномальное же отражение наблюдается в основном над сильными магнитными аномалиями, откуда и было взято название. Смещение в сторону больших полей относительно нормальной составляющей, а также её некоторый наклон говорят нам о возможной зависимости от величины поля в данной области, т.е. коэффициент отражения растет с ростом  $|B|$ .

Попробуем локализовать данные области на нашем распределении, выделить их особенности, а также попробуем выяснить их зависимость от величины поля.

#### **4.3.1. Изолированная область нормального отражения.**

Для выделения нормальной составляющей распределения, которая в первую очередь характеризуется небольшим коэффициентом отражения, возьмем область малых полей и отражений в правом верхнем углу (рис. 17). Размер области составлял 18 на 28 градусов.

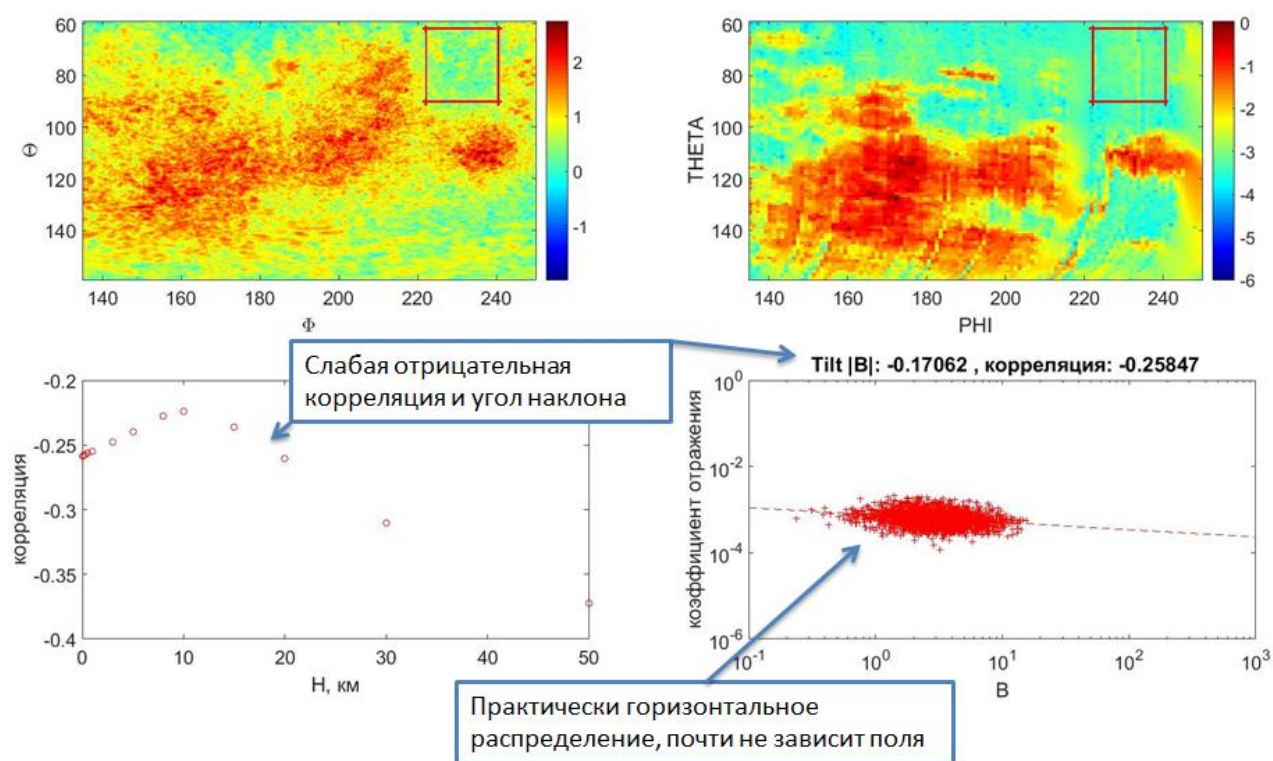


Рисунок 17. Область нормального отражения. Обозначения аналогичны рис. 13.

Здесь наблюдается локализованная нижняя область прежнего распределения, что подтверждает гипотезу о природе данной части распределения. Коэффициент отражения принимает в этой области значения от 0.0001 до 0.002 со средним значением равным 0.0007 для интенсивностей поля в пределах от 0,7 до 23 нТ, что говорит о наличии только нормальной составляющей отражения при малых значениях поля.

Стоит также отметить отрицательное значение коэффициента корреляции в данной области. Это может быть связано с тем, что увеличение поля ведет к уменьшению доступа солнечного ветра к поверхности, что приводит к ослаблению нормальной составляющей отражения. Но в целом этот наклон находится в пределах «шума» наших измерений, поэтому в дальнейшем он не будет учитываться, и для выявления вида зависимости эта область будет приниматься как некое «плато» для малых значений поля.

Можно предположить, что дальнейшее увеличение поля приведет к появлению аномального отражения и переходу распределения к виду с большими коэффициентами отражения, что мы наблюдали ранее. Для этого стоит детальнее изучить вид аномальной компоненты поля.



### 4.3.2 Изолированная область аномального отражения.

Для наблюдения аномальной компоненты следует взять область сильного поля и большого коэффициента отражения. Для этого подойдет тот самый «кластер» магнитных аномалий, о котором сообщалось в других исследованиях (рис. 18).

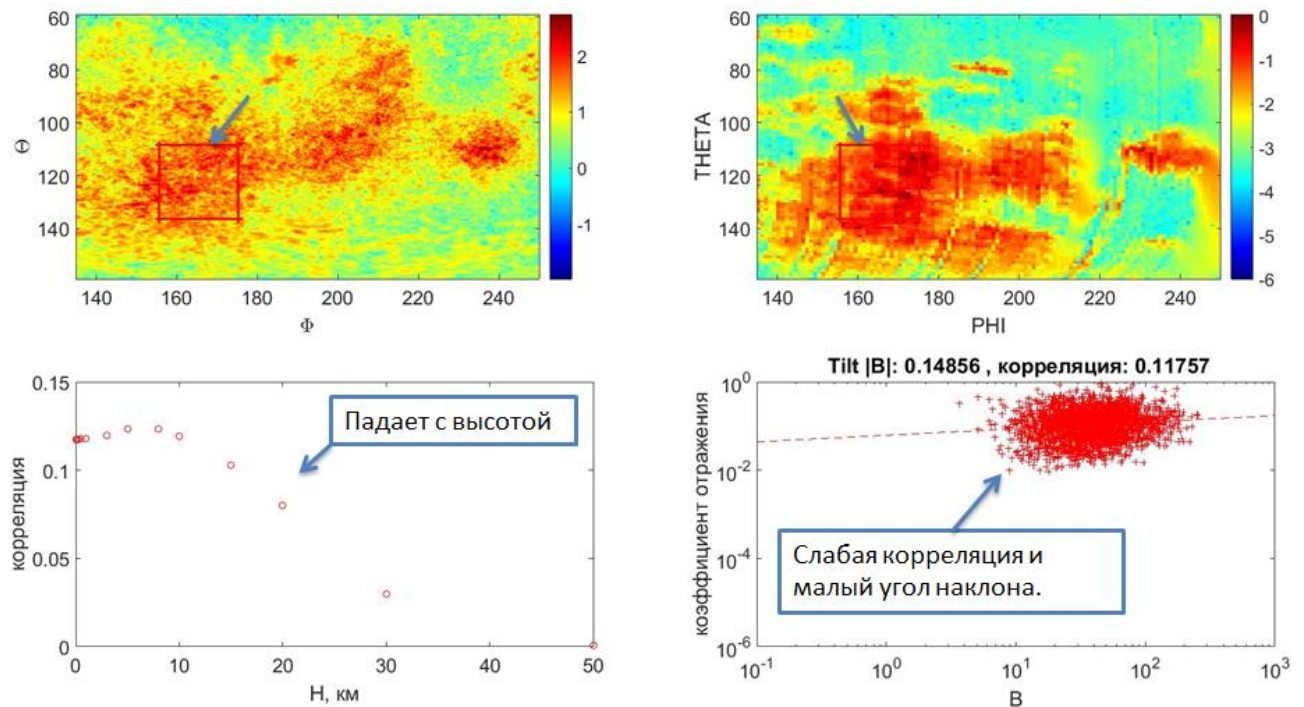


Рисунок 18. Изолированная область аномального отражения. Обозначения аналогичны рис. 13.

Корреляция данной области оказывается очень слабой, которая при этом ещё и уменьшается с высотой практически до 0. Такой вид коэффициента корреляции, а также очень малый угол наклона, говорят нам о практически отсутствующей **линейной** зависимости при высоких значениях поля.

Можно предположить о наличии «плато» при больших значениях поля, так как магнитные поля большой интенсивности должны отражать весь падающий поток частиц (т.е. коэффициент отражения приближается к 1). Поэтому мы не можем утверждать, что существует линейная зависимость коэффициента отражения от величины поля. Есть необходимость дополнить данную область значениями с меньшей интенсивностью поля.

### 4.3.3. Расширенная область аномального отражения.

Для более детального изучения области аномального отражения прежнее рассмотрение было дополнено двумя дополнительными окнами в иных областях кластера магнитных аномалий с иными значениями интенсивности магнитного поля.

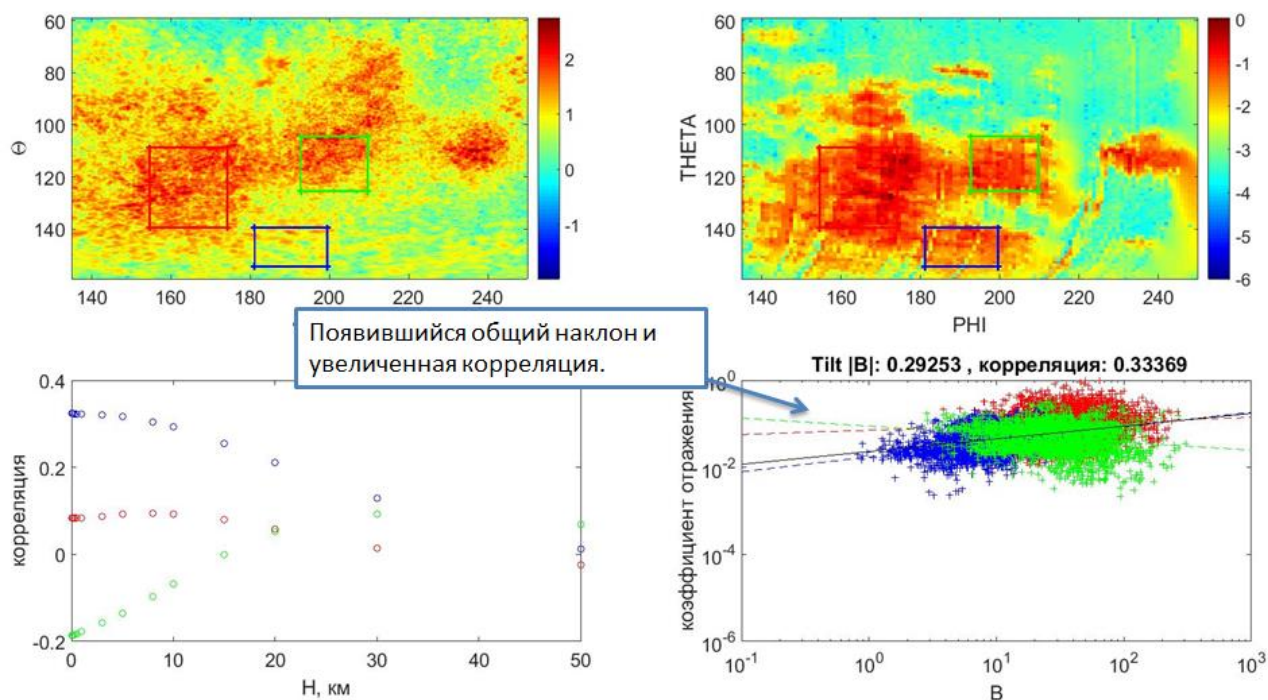


Рисунок 19. Расширенная область аномального отражения. Обозначения аналогичны рис. 13. Черным цветом отмечен общий наклон суммы областей, корреляция также была сосчитана для суммарного распределения.

При учете дополнительных областей предыдущая картина получила продолжение в областях меньших полей (рис. 19). Выявился некоторый общий наклон, а также увеличенная линейная корреляция, что дает нам большее представление о виде данной зависимости: увеличение магнитного поля приводит некоторому постепенному увеличению коэффициента отражения до некоторой предельной величины, после которой существенное увеличение отражения не происходит, сохраняясь примерно на одном уровне.

Исходя из всего вышесказанного, мы окончательно можем сделать вывод о наличии нелинейной связи между полем и коэффициентом отражения. Поэтому следует попробовать найти функциональный вид данной зависимости, объединяющей эти две области со слабой корреляцией.

#### 4.4. Изучение общего вида зависимости коэффициента отражения от величины магнитного поля.

Для наиболее точного определения вида данной зависимости построим на одном графике сразу по паре областей разного вида (рис. 20). Это нам позволит более явно выделить два имеющихся плато при сильных и малых величинах магнитного поля для дальнейшей аппроксимации.

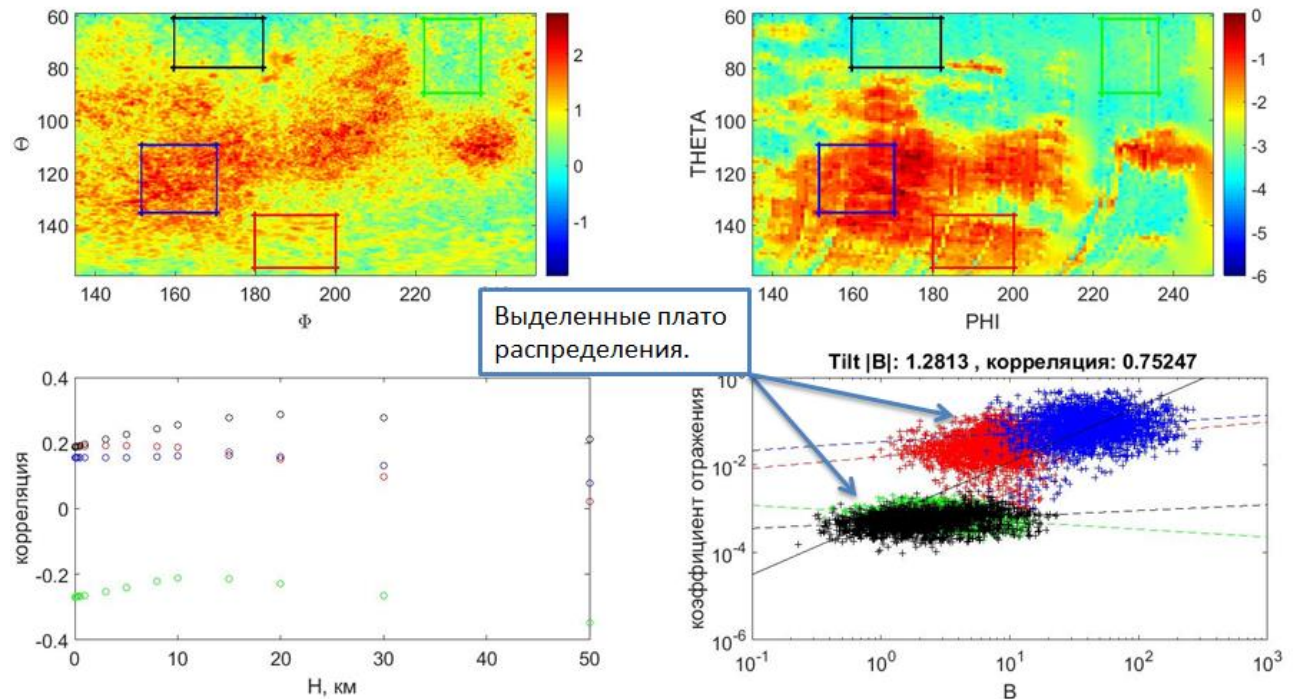


Рисунок 20. Суммарное распределение областей нормального и аномального отражений. Обозначения аналогичны рис. 13.

Построив такое распределение, мы получили картину, схожую с распределением всей области, за исключением переходной области между этими двумя процессами. Все эти области, обладающие низкой корреляцией и малым углом наклона, в сумме дают корреляцию больше 0.75. Такая особенность распределения и позволяет нам выявлять магнитные аномалии по коэффициенту отражения ионов. Имеет также смысл попробовать аппроксимировать данное нелинейное распределение кривой.



#### 4.4.1 Функциональный вид распределения коэффициента отражения от величины магнитного поля.

По всему вышеперечисленному формой данной зависимости являются два горизонтальных участка при сильных и слабых полях, а также некоторый линейный переход между ними, когда два вида отражения сосуществуют. Так как до этого попыток аппроксимировать подобную зависимость никем не предпринималось, мы будем использовать самое простое приближение подобного вида: смещенный гиперболический тангенс (рис. 16):

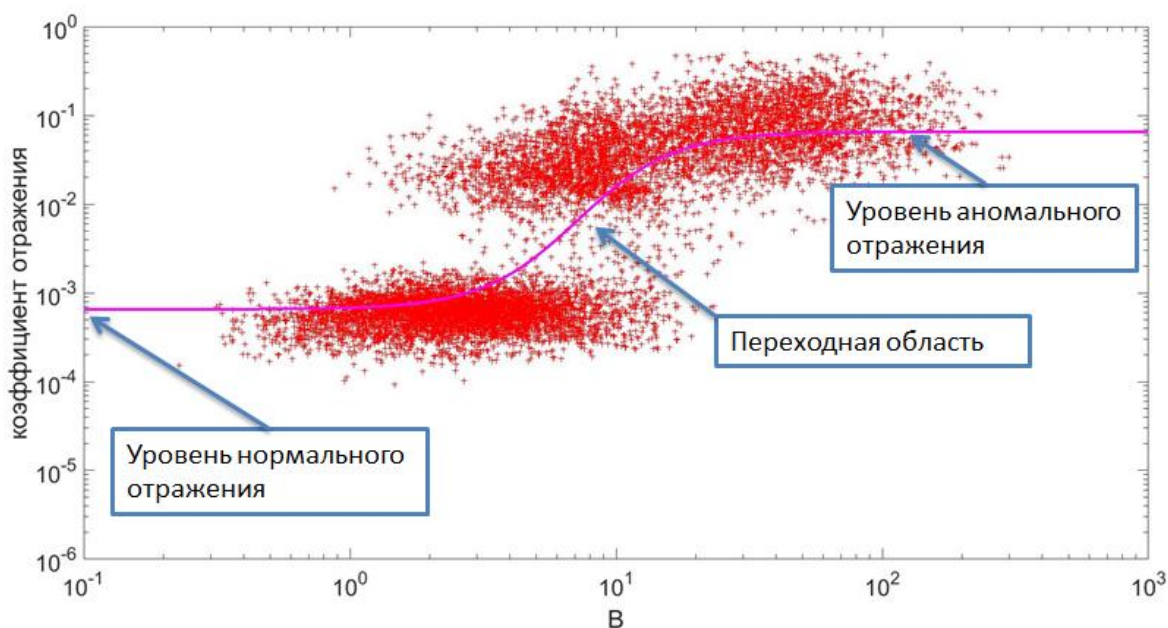


Рисунок 21. Аппроксимация распределения гиперболическим тангенсом.

Кривая в виде гиперболического тангенса позволяет описать общий вид зависимости коэффициента отражения от величины магнитного поля, задавая одновременно средний ожидаемый уровень аномального и нормального отражений, а также переход между ними (рис. 21). Так, при рассмотрении разных областей, мы получили эффективность аномального отражения на уровне 7-10%, что соответствует предыдущим исследованиям. Однако, высокий уровень шума и пересечение данных областей при равных значениях поля создают некоторые трудности для аппроксимации и выявления закона возрастания коэффициента отражения в промежуточной области.

Более подробное изучение оставим для следующих исследований, в которых попробуем учесть зависимость коэффициента отражения от пространственных размеров магнитных структур, а также будем учитывать различные компоненты поля.

## 5. Заключение.

В данной работе мы изучили зависимость коэффициента отражения протонов солнечного ветра от величины поля магнитных аномалий и пришли к следующим выводам:

- Коэффициент отражения существенно возрастает с увеличением поля.
- Наибольшую корреляцию с отражением имеют поля на высотах 15-30км (вероятно, вертикальный размер минимагнитосфер)
- Поток протонов, отраженных от Луны, состоит из двух составляющих: нормальной компоненты (отражение от поверхности) и аномальной (отражение от магнитных аномалий). При больших полях ( $> 40\text{нТ}$  у поверхности) отражение аномально, при малых полях ( $< 5\text{нТ}$ ) нормально, при промежуточных значениях ( $5...40\text{нТ}$ ) присутствуют обе компоненты.
- Зависимость коэффициента отражения от величины магнитного поля имеет нелинейный характер, который для малых и средних магнитных полей (до  $100\text{нТ}$ ) приближенно можно аппроксимировать гиперболическим тангенсом.

Предположительно, дальнейшие исследования зависимости коэффициента отражения от величины магнитного поля смогут дать больше информации о параметрах минимагнитосфер, а также позволят разработать более совершенные методы измерения магнитного поля в освещенных областях Лунной поверхности.

## Список литературы.

1. Wieczorek, M. A., et al. "New views of the moon." *Rev. Min. Geochem* 60 (2006): 221-364.
2. Hood, L. L. "Geophysical constraints on the lunar interior." *Origin of the Moon*. 1986.
3. Smith, J. V., Anderson, A. T., Newton, R. C., Olsen, E. J., Crewe, A. V., Isaacson, M. S., ... & Wyllie, P. J. (1970). Petrologic history of the moon inferred from petrography, mineralogy and petrogenesis of Apollo 11 rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 1, 897.
4. Wood, J. A., Dickey Jr, J. S., Marvin, U. B., & Powell, B. N. (1970). Lunar anorthosites and a geophysical model of the moon. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 1, 965..
5. Lawrence, D. J., Feldman, W. C., Barraclough, B. L., Binder, A. B., Elphic, R. C., Maurice, S., & Thomsen, D. R. (1998). Global elemental maps of the Moon: The Lunar Prospector gamma-ray spectrometer. *Science*, 281(5382), 1484-1489.
6. Cravens, Thomas E. *Physics of solar system plasmas*. Cambridge University Press, 2004.
7. Farrell, W. M., Kaiser, M. L., Steinberg, J. T., & Bale, S. D. (1998). A simple simulation of a plasma void: Applications to Wind observations of the lunar wake. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A10), 23653-23660.
8. Holmström, M., Fatemi, S., Futaana, Y., & Nilsson, H. (2012). The interaction between the Moon and the solar wind. *Earth, planets and space*, 64(2), 17.
9. Dyal, Palmer, Curtis W. Parkin, and William D. Daily. "Magnetism and the interior of the Moon." *Reviews of Geophysics* 12.4 (1974): 568-591.
10. Hood, L. L., Zakharian, A., Halekas, J., Mitchell, D. L., Lin, R. P., Acuña, M. H., & Binder, A. B. (2001). Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using Lunar Prospector magnetometer data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E11), 27825-27839.
11. Purucker, M. E., & Nicholas, J. B. (2010). Global spherical harmonic models of the internal magnetic field of the Moon based on sequential and coestimation approaches. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115(E12).
12. Tsunakawa, H., Takahashi, F., Shimizu, H., Shibuya, H., & Matsushima, M. (2015). Surface vector mapping of magnetic anomalies over the Moon using Kaguya and Lunar Prospector observations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120(6), 1160-1185.
13. Richmond, N. C., and L. L. Hood. "A preliminary global map of the vector lunar crustal magnetic field based on Lunar Prospector magnetometer data." *Journal of Geophysical Research: Planets* 113.E2 (2008).
14. Mitchell, D. L., Halekas, J. S., Lin, R. P., Frey, S., Hood, L. L., Acuña, M. H., & Binder, A. (2008). Global mapping of lunar crustal magnetic fields by Lunar Prospector. *Icarus*, 194(2), 401-409.
15. Dyal, P., Parkin, C. W., Snyder, C. W., & Clay, D. R. (1972). Measurements of lunar magnetic field interaction with the solar wind. *Nature*, 236(5347), 381.
16. Saito, Y., Nishino, M. N., Fujimoto, M., Yamamoto, T., Yokota, S., Tsunakawa, H., ... & Takahashi, F. (2012). Simultaneous observation of the electron acceleration and ion deceleration over lunar magnetic anomalies. *Earth, planets and space*, 64(2), 4.

17. Russell, C. T., and B. R. Lichtenstein. "On the source of lunar limb compressions." *Journal of Geophysical Research* 80.34 (1975): 4700-4711.
18. Lin, R. P., Mitchell, D. L., Curtis, D. W., Anderson, K. A., Carlson, C. W., McFadden, J., ... & Binder, A. (1998). Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: Results from Lunar Prospector. *Science*, 281(5382), 1480-1484.
19. Halekas, J. S., Delory, G. T., Brain, D. A., Lin, R. P., & Mitchell, D. L. (2008). Density cavity observed over a strong lunar crustal magnetic anomaly in the solar wind: A mini-magnetosphere?. *Planetary and Space Science*, 56(7), 941-946.
20. Harnett, E. M., & Winglee, R. (2000). Two-dimensional MHD simulation of the solar wind interaction with magnetic field anomalies on the surface of the Moon. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A11), 24997-25007.
21. Futaana, Y., Barabash, S., Holmström, M., & Bhardwaj, A. (2006). Low energy neutral atoms imaging of the Moon. *Planetary and Space Science*, 54(2), 132-143.
22. Wieser, M., Barabash, S., Futaana, Y., Holmström, M., Bhardwaj, A., Sridharan, R., ... & Asamura, K. (2010). First observation of a mini-magnetosphere above a lunar magnetic anomaly using energetic neutral atoms. *Geophysical Research Letters*, 37(5).
23. Saito, Y., Yokota, S., Asamura, K., Tanaka, T., Nishino, M. N., Yamamoto, T., ... & Hirahara, M. (2010). In-flight performance and initial results of plasma energy angle and composition experiment (PACE) on SELENE (Kaguya). *Space science reviews*, 154(1-4), 265-303.
24. Lue, C., Futaana, Y., Barabash, S., Wieser, M., Holmström, M., Bhardwaj, A., ... & Wurz, P. (2011). Strong influence of lunar crustal fields on the solar wind flow. *Geophysical Research Letters*, 38(3).
25. Deca, Jan, and Andrey Divin. "Reflected Charged Particle Populations around Dipolar Lunar Magnetic Anomalies." *The Astrophysical Journal* 829.2 (2016): 60.
26. Fairfield, Donald H. "Average and unusual locations of the Earth's magnetopause and bow shock." *Journal of Geophysical Research* 76.28 (1971): 6700-6716.
27. Shue, J. H., Chao, J. K., Fu, H. C., Russell, C. T., Song, P., Khurana, K. K., & Singer, H. J. (1997). A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A5), 9497-9511.
28. Halekas, J. S., Brain, D. A., Mitchell, D. L., Lin, R. P., & Harrison, L. (2006). On the occurrence of magnetic enhancements caused by solar wind interaction with lunar crustal fields. *Geophysical research letters*, 33(8).
29. Greenstadt, E. W. (1971). Conditions for magnetic interaction of asteroids with the solar wind. *Icarus*, 14(3), 374-381.
30. Fatemi, S., Fuqua, H. A., Poppe, A. R., Delory, G. T., Halekas, J. S., Farrell, W. M., & Holmström, M. (2015). On the confinement of lunar induced magnetic fields. *Geophysical Research Letters*, 42(17), 6931-6938.
31. Deca, J., Divin, A., Lembège, B., Horányi, M., Markidis, S., & Lapenta, G. (2015). General mechanism and dynamics of the solar wind interaction with lunar magnetic anomalies from 3-D particle-in-cell simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(8), 6443-6463.